第34卷 第2期 昆虫学报 Vol. 34, No. 2
1991年5月 ACTA ENTOMOLOGICA SINICA May, 1991

# 蝉的变音调复合声和发声机制的分析*

蒋锦昌 徐慕玲 刘燕
(中国科学院生物物理研究所，北京 100080)

**摘要** 蛙鸣蝉 (*Meimuna opalifera* (Walk). ab. *punctata* Kato) 的自然鸣声为 "ji…guāi" 的重复单变调复合声。"ji" 为主音频约4800Hz的准单音；"guái" 的波形和主音频呈明显的演变，优势主频约2100Hz 和 2800Hz 的变音调声。鸟鸣蝉 (*Meimuna opalifera* (Walk) var. *formosana* Kato) 的自然鸣声由重复的 "jiū…ruǎ" 和 "jiū…gū…" 合成的双变调复合声。"jiū" 为基频和主频分别约 625Hz 和 2100—2300Hz 的准单音；"ruǎ" 的波形和主音频呈明显的演变，基音和优势主频分别约 575—625Hz 和 1550—1750Hz 的变音调声。"gū" 为优势主频约 625Hz 的准单音。变音调复合声不仅与腹部运动有关，而主要取决于发声肌的收缩特性和发声膜肋结构的振动特性。

**关键词** 蛙鸣蝉 鸟鸣蝉 变音调复合声 发声机制

在蝉鸣声的研究中，变音调蝉鸣声的研究甚少。某些研究仅仅给出局部声段的一般结构，及其与腹部运动的宏观关系 (Young, 1972; 蒋锦昌等, 1987)，缺乏全声段波形结构和频谱演变的分析，及其发声机制的研究。由鸣虫发声学和声响技术系统生物原型研究角度上来看，变音调蝉鸣声的特征和机理的研究比单音色蝉鸣声更具有重要的实际意义。

据此，本文对蛙鸣蝉 *Meimuna opalifera* (Walk). ab. *punctata* Kato 和鸟鸣蝉 *Meimuna opalifera* (Walk) var. *formosana* Kato 的变音调鸣声进行了语图、全声段波形结构和频谱的演变过程及其发声机理进行了分析。这不仅对鸣虫发声学的研究有新的认识，而且为声响系统生物原型的研究提供了有用的依据。

## 一、记录和分析方法

蛙鸣蝉和鸟鸣蝉的自然鸣声分别由 SONY-TCM-6 型和 OLYPUS-X-02 型录音机接原配外接话筒记录。采集(蛙鸣蝉采于 1987 年 9 月广东昆虫研究所院内，鸟鸣蝉采于 1984 年 7 月庐山)的标本同于定种名 (参照 Kato, 1932) 和发声膜与其他发声结构的观察。

记录的鸣声由 SHARP-GF-515 型录音机回放，输入 662B 型谱图仪 (频响 85—12000Hz) 进行语图分析。同时输入 SM-2700 型 FFT 分析仪进行波形结构和频谱分析。分析频带选用 10kHz，分析长度分别选用 32 和 64k 字节内存 (40ms/k 字节)，分析结果由 SR6620 型数字绘图仪直接给出。

本文于 1988 年 6 月收到。
本研究为国家自然科学基金资助项目。

## 二、蛙鸣蝉的鸣声特征

蛙鸣蝉的自然鸣声(1987.9.广州)近似“ji…guái”的重复声(图 1)。其中,“guái”酷似蛙鸣声,故称之“蛙鸣蝉”。

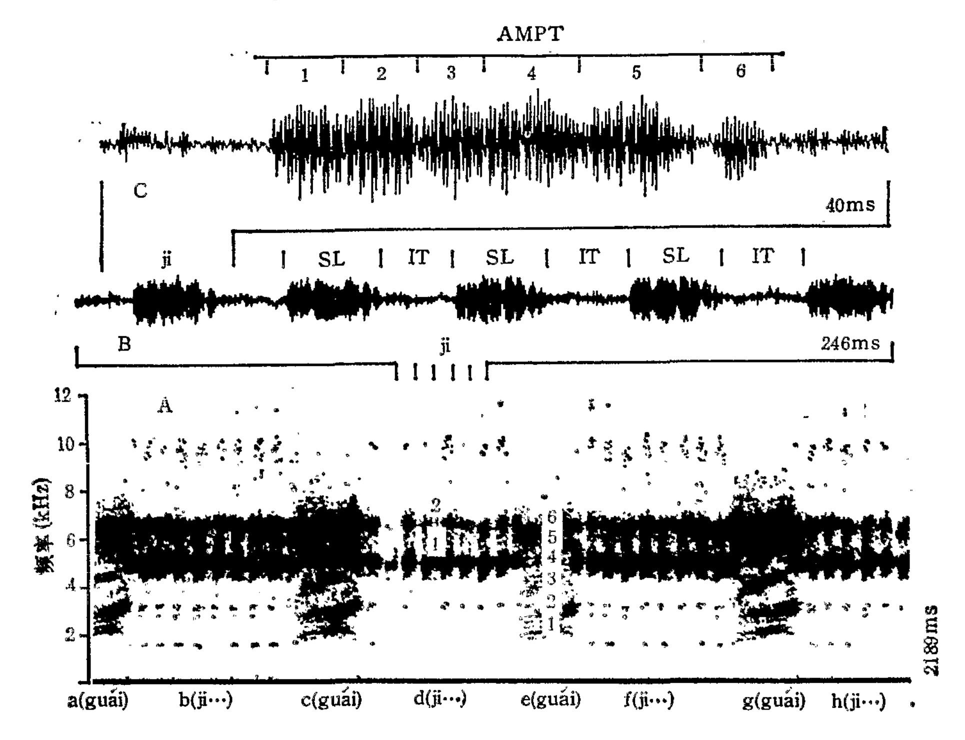



图 1 蛙鸣蝉自然鸣声的语图(A)和“ji”的示波图(B、C)
A:d 中,1、2——“ji”的非谐分音($NSH_{1,2}$); A:e 中,1、2 ……6——“guái”的 $NSH_{1-6}$; SL——声长; IT——间歇; AMPT——调幅脉冲列

图 1A 中,每个“ji…guái”由 8 个“ji”和“guái”组成。“ji”的 SL 和 IT 分别为 28.21±1.56ms 和 22.40±1.54ms,平均重复频率($\overline{RF}$)约 20Hz。其 $NSH_1$ 的主频率为 4872±86Hz,幅值(198.7±23.4mV)比 NSHz 的主频率 6525±90Hz 约高 8.2dB。同时,具有基本相同的结构层次(图 1B、C),即每个“ji”含有 6 个规则型 AMPT,其声脉冲的组合形态和密度基本相同。

图 1A 中“guái”的 SL 约 200ms,其示波图表明,含有 47 个脉冲列(PT)。在“ji—guái—ji”的变音过程中,“ji”的 AMPT 逐步失去调幅特性,演变为准等幅 PT,其脉冲密度随之下降,而幅值随之增高;尔后调幅特性和脉冲密度逐步增高,演变为“ji”。同时,其频谱特性产生相应的变化(图 2)。

图 2A—E 表明,“guái”中 $NSH_{1-6}$ 的主频率幅值呈明显的变化。PT1—9、PT10—18、PT19—28、PT29—37 和 PT38—47 的主音频分别为 3775Hz(A 中 3)、2150 和 2815Hz(B 中 1 和 2)、2150 和 2800Hz(C 中 1 和 2)、2175 和 2875Hz(D 中 1 和 2)和 5175Hz(E 中 4)。同时,47 个 PT 的总频谱(图 2F)中,$NSH_2$ 的主频率 2825Hz(幅值为 44.5mV)分别比 $NSH_{1,3-6}$ 的主频率 2150、4325、5170、5775 和 6575Hz 高 0.4、4.9、2.5、

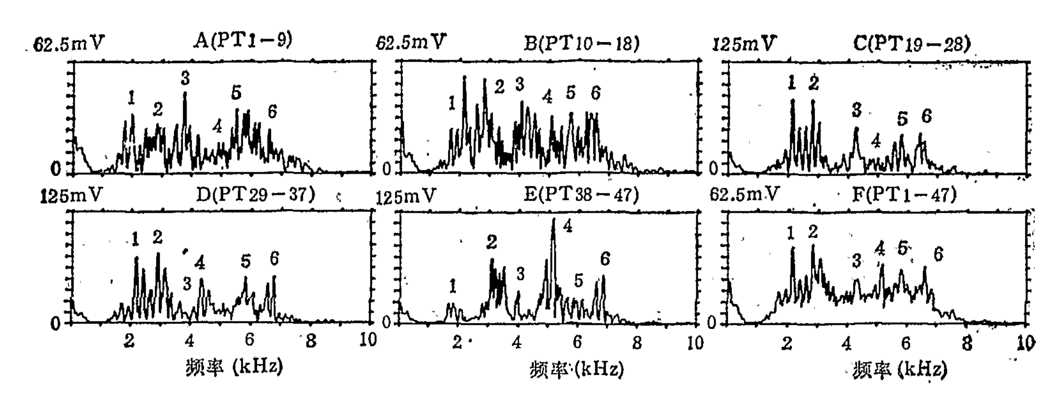



图 2 "guái" 的频谱演变
A—F 中的 1、2……6 分别为 $NSH_{1,2\cdots6}$ 的主频率

3.3 和 2.7dB。

由此可见，蛙鸣蝉的自然鸣声是由主音调约 4800Hz 的重复准单音节 "ji" 和优势主音调约 2100Hz 和 2800Hz 的变调声 "guái" 合成的单变调复合声。

## 三、鸟鸣蝉的鸣声特性

鸟鸣蝉的自然鸣声由重复的 "jiū…ruǎ" 接 "jiū…gū…" 的双变调复合声（蒋锦昌

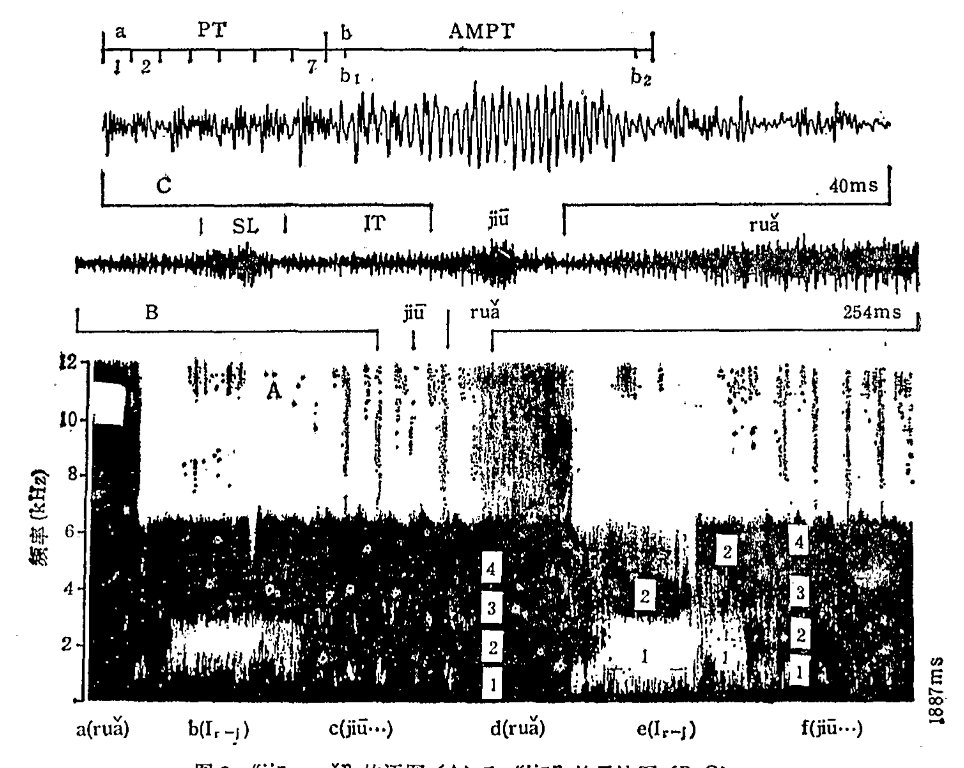



图 3 "jiū…ruǎ" 的语图 (A) 和 "jiū" 的示波图 (B、C)
A：$I_{r-j}$ 为两个 "jiū…ruǎ" 的间歇；d 中1—4，c 中 1、2 和 f 中 1—4 分别为 "ruǎ"，$I_{r-j}$ 和 "jiū" 的 NSH；其他缩写同图 1B、C

等，1987)。"jiū…ruǎ"的特征见图 3。

图 3A 表明，每个"jiū…ruǎ"中含 4—5 个 SL 和 IT 分别为约 24ms 和 50ms 的"jiū"，其 $\overline{RF}$ 约 14Hz。频谱分析表明，其 $NSH_{1-4}$ 的主频率分别为 625、2300、4200 和 5925Hz，其 $NSH_2$ 的主频率幅值（237.9mV）分别比其他高 13.7、11.0 和 12.8dB。同时，"jiū"具有基本相同的波形结构（图 3B、C），其 PT 的幅值逐步增大，演变为准正弦 AMPT，其载波的主频率约 2318Hz（$b_1b_2$ 为 14.67ms，含34个脉冲），与 $NSH_2$ 的主频率相一致。

图 3A 中"ruǎ"的 SL 约 280ms，其示波图表明，波形结构呈明显的变化。开头约 40ms 为幅值逐步增大的低幅 PT；后约 200ms 逐步演变为连续等幅 PT；最后 40ms 的前 20ms 接近准正弦等幅波，后 20ms 脉冲幅值逐步衰减而接近 $I_{r-j}$。同时，频谱分析表明，其频谱特性也随之变化。开头 40ms 的主音频为 $NSH_4$ 的主频率(5650Hz)；后 160ms 的主音频为 $NSH_2$ 的主频率（1550Hz）；最后 80ms 的主音频为 $NSH_2$ 的主频率（1750Hz）。280ms 的总频谱表明，主要能量集中在 $NSH_2$ 的主频率 1550Hz 和 1750Hz（约低 1.1dB），其 $NSH_{1,3,4}$ 的主频率 575—625Hz、2550Hz 和 5675Hz 分别比

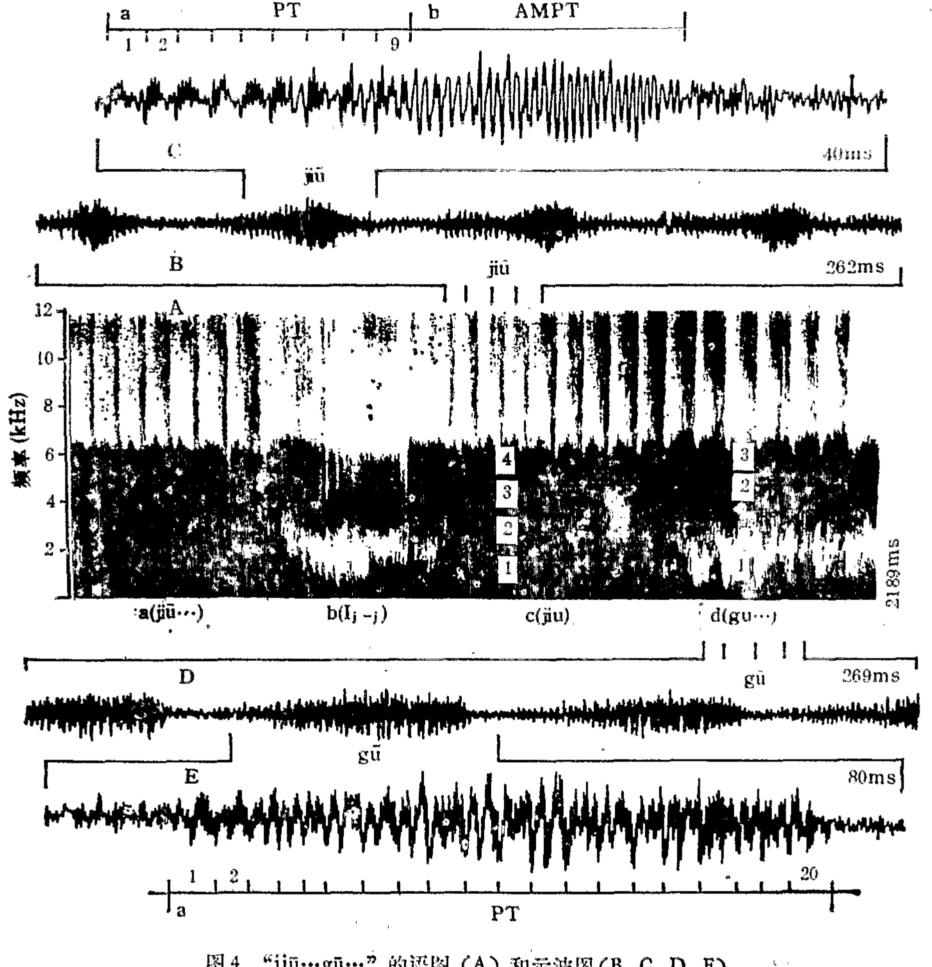



图 4 "jiū…gū…"的语图（A）和示波图（B、C、D、E）
A：c 中 1—4 和 d 中 1—3 分别为"jiū"和"gū"的 NSH

$NSH_2$ 的主频率 1550Hz（幅值为 126.63mV）低 8.1、5.9 和 6.7dB。

可见，"jiū…ruǎ" 是由基频和主频分别约 625 和 2300Hz 的准单音节 "jiū" 与基频和优势主频分别为 575—625 和 1550—1750Hz 的变调声 "ruǎ" 合成的变音调复合声。

"jiū…gū…" 的特征，见图 4。

图 4A、B、C 表明，"jiū…gū…" 中含 9 个 "jiū"，其语图和波形结构与 "jiū…ruǎ" 中的 "jiū" 基本相同，其频谱也基本相同。9 个 "jiū" 的平均谱表明，$NSH_{1-4}$ 的主频率分别为 575、2125、3875 和 5200/5975Hz（比 5200Hz 低约 0.8dB），其主音频 2125Hz 分别比其他主频率约高 4.5、6.0 和 7.0dB。

图 4A、D、E 表明，"gū"（只给出 7 个，通常为 14 个）的结构特征基本相同，SL 约 72ms，都含有 3 个 NSH。14 个 "gū" 的平均谱表明，$NSH_{1-3}$ 的主频率分别为 625、3975 和 5925Hz。$NSH_1$ 的主频率 625Hz 既是基音频又是主音频，即分别比 $NSH_{2,3}$，的主频率高约 3.6dB 和 6.2dB。

可见，"jiū…gū…" 是由基频和主音频分别为 575 和 2125Hz 的准单音节 "jiū" 的重复声，与主调音为 625Hz 的准单音节 "gū" 的重复声合成的变调复合声。

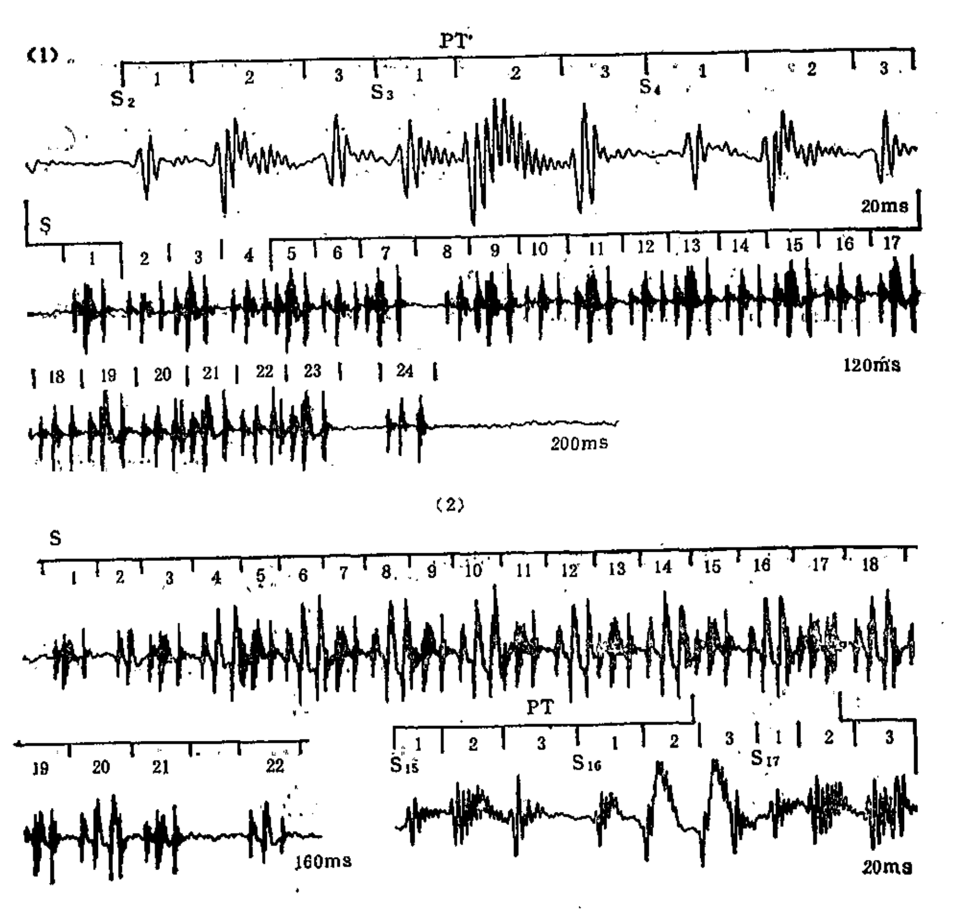



图 5　鸟鸣蝉室内鸣声的示波图
（1）腹部保持平稳的自鸣声　（2）腹部向下弯曲的鸣声
S：音节单元　PT：脉冲列

# 四、发声机制的讨论

实际观察表明，蛙鸣蝉发“ji”时腹部上下运动，发“guái”时腹部向前运动。鸟鸣蝉自然鸣叫时伴随更为复杂的腹部运动(蒋锦昌等，1987)。由蝉腹腔的气室具有共鸣腔的功能和其两侧气门调节气流速度的功能来看(蒋锦昌等，1986、1989a、c)，其变音调鸣声显然与腹部运动有关。但是由其波形结构和主调音的演变特性来看，还与发声膜肋结构振动的原初过程有关(图 5)。

图 5(1) 表明，腹部平稳的自鸣声由整齐的 S 组成，每个 S 含有 3 个 PT 其 $S_{2n-1}$ 和 $S_{2n}$ 分别具有基本相同的结构特征，即分别由两侧发声膜交替动作产生的。由黑蝉 (*Cryptotympana atrata* Fabricius) 的发声机制来看(蒋锦昌等，1988、1989b)，每个 S 中的 $PT_{1,2,3}$ 分别是由其两侧发声膜上半部三条长肋振动产生的，但是 PT 的结构特征有明显差异。同时，图 5(1) 中 $S_{1-24}$ 的频谱与相应波形的时间特性相比较，基频 475Hz 与 PT 的 $\overline{RF}$ (约 465Hz) 相对应，主峰频率 5150Hz 与 $S_{2n-1}$ 中的 $PT_2$ 相对应，其他峰值频率 3875、4475 和 4700Hz 分别与 $S_{2n}$ 中的 $PT_{1,3}$、$PT_2$ 和 $S_{2n-1}$ 中的 $PT_{1,3}$ 相对应。同时，由黑蝉和变音调鸣声的鸣鸣蝉 (*Oncotympana maculaticollis* Motsch) 发声肌收缩特性来看(蒋锦昌等，1989b、c、1990)，鸟鸣蝉发声膜三条长肋振动特性的差异性，与其发声肌收缩过程中的颤动特性有关。

图 5(2) 表明，腹部向下弯曲运动时鸣声的波形结构和主音频为 600Hz (相应波形的频谱分析)都与“gū”基本相同。可见，腹部运动确有辅助发声功能。同时，其他辅助发声结构(音盖、鼓盖和褶膜等)和腹板薄而半透明，都明显不同于单音调鸣声的黑蝉。这些对变音调复合声的产生也都会有一定的影响。

必须指出，野外用录音机的频响只到 8000Hz，所以 8000Hz 以上的频率特性分析受到限制。

## 参 考 文 献


蒋锦昌等 1986 黑蚱蝉 (*Cryptotympana atrata* Fabricius) 发声装置的结构和功能。声学学报(英文版) **5**(2): 174—84。

蒋锦昌等 1987 蝉的发声膜结构和腹部运动对鸣声的影响。生物物理学报 **3**(2): 105—11。

蒋锦昌 1988 黑蝉发声膜的力学特性和发声机制。中国科学 B(9): 927—38。

蒋锦昌等 1989a 黑蝉鸣声的方向性和第三气门的功能。生物物理学报 **5**(1): 63—9。

蒋锦昌等 1989b 黑蝉主发声器的动力学特性。中国科学 B(5): 455—63。

蒋锦昌等 1989c 黑蝉辅助发声器的动力学特性。中国科学 B(12): 1263—71。

蒋锦昌等 1990 鸣鸣蝉 (*Oncotympana maculaticollis* Motsch) 鸣声的变频特性及其动力学过程。中国科学 B(9): 933—41。

Kato, M. 1932 Study of Cicadidae. Published by Sansentan. (in Japanese).

Young, D. 1972 Neromuscular mechanism of sound production in Australian cicadas. *J. Comp. Physiol* **79**: 343—62.

# THE VARI-TONED COMPLEX SONGS IN CICADAS AND AN ANALYSIS OF THE MECHANISM OF THEIR SOUND PRODUCTION

JIANG JIN-CHANG　XU MU-LING　LIU YAN

*(Institute of Biophysics, Academia Sinica, Beijing* 100080)

In the frog-song cicada (*Meimuna opalifera* (Walk). ab. *punctata* Kato), the natural song is a single vari-toned complex song of repetition in "ji···guái". "Ji" is a yuasi-monotone of the basic tone frquency at about 4800 Hz. Obvious evolutions occur both in acoustic waveform and in basic tone frquency of "guái", and it is a vari-toned sound with the dominant basic tone frequency at about 2100 Hz and 2800 Hz.

In the bird-song cicada (*Meimuna opalifera* (Walk) var. *formosana* Kato), the natural song is a dual vari-toned complex song composed by repetition "jiū···ruǎ" and jiū···gū···". "Jiū" is a quasi-monotone of which the fundamental frequency and basic tone frequency are about 625 Hz and 2100—2300 Hz, respectively. Obvious evolutions occur both in acoustic waveform and in basic tone frequency of "ruǎ", and it is a varitoned sound of which the fundamental frequency and dominant basic tone frequency are 575—675 Hz and 1550—1750 Hz, respectively. "gū" is a quasi-monotone of dominant basic tone frequency at about 625 Hz.

The vari-toned complex songs are not only related to abdominal movement but also are mainly dependent on the vibration property of the rib structures in the sounding membranes and contraction property of the sounding muscles.

**Key words** *Meimuna opalifera* (Walk). ab. *punctata* Kato——*Meimuna opalifera* (Walk) var. *formosana* Kato——vari-toned complex song——mechanism of sound production